

文章编号 1004-924X(2015)11-3200-11

Si₃N₄ 陶瓷旋转超声磨削加工的表面摩擦特性

荆君涛¹, 冯平法¹, 魏士亮^{2*}, 王和旭²

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084;

2. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 154001)

摘要:为了探索结构陶瓷材料在摩擦过程中表面形貌的变化规律及其对摩擦特性影响,分析了摩擦过程中材料的接触过程及力学关系,并对旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样开展了摩擦表面形貌、摩擦因数等特性的试验研究。首先根据接触特点和材料特性,基于分形理论推导出接触面总载荷计算公式,基于该公式建立了结构陶瓷摩擦因数分形模型。分析结果表明:当初始表面轮廓分形维数分别为 1.4, 1.45, 1.5 和 1.55 时,摩擦因数与摩擦后表面轮廓分形维数呈类似正态分布曲线。然后通过旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样表面接触摩擦试验,研究了摩擦后陶瓷材料表面微观形貌和摩擦因数变化规律,分析了各因素对摩擦因数的影响。试验结果表明:产生微观裂纹是 Si₃N₄ 陶瓷摩擦后表面微观形貌的显著特点;温度值等于 160℃ 是 Si₃N₄ 陶瓷摩擦因数由下降转为上升的拐点;当施加载荷为 360 N 和往复频率为 80 Hz 时,摩擦因数最大。得到的结果为通过表面形貌控制提高结构陶瓷耐磨性能提供了技术支撑。

关键词: Si₃N₄ 陶瓷;分形维数;摩擦特性;表面形貌控制;旋转超声磨削

中图分类号: TH117; TQ174.758.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3200

Surface friction characteristics of Si₃N₄ ceramics machined by rotary ultrasonic grinding

JING Jun-tao¹, FENG Ping-fa¹, WEI Shi-liang^{2*}, WANG He-xu²

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 154001, China)

* Corresponding author, E-mail: weishiliang@hrbeu.edu.cn

Abstract: For investigating on the surface morphology variation of structure ceramic materials and its effect on the friction characteristics during friction, the relationships between contact and mechanical were analyzed in friction process. Meanwhile, the friction characteristics of Si₃N₄ ceramic samples machined by rotary ultrasonic grinding, such as friction surface morphology and friction coefficient were studied with experiments. First, according to the contact characteristics and material properties, the calculation formula of the total load was deduced based on fractal theory. The friction coefficient fractal model was also established on the basis of above. The analysis results shows that the relationship between friction coefficient and surface profile fractal dimension after friction is similar to the normal distribution curve, when the initial surface profile fractal dimension is 1.4, 1.45, 1.5 and

收稿日期:2015-05-15;修订日期:2015-07-13.

基金项目:黑龙江省自然科学基金重点项目(No. ZD201313);“十二五”航天支撑技术预研项目(No. 61801060103)

1.55 respectively. Then with surface to surface contact friction experiments of Si₃N₄ ceramic sample machined by rotary ultrasonic grinding, surface topography and friction coefficient variation after friction were investigated. And the influence factors on the friction coefficient were also analyzed. The results indicate that micro-cracks are the notable feature of the surface morphology for Si₃N₄ ceramic friction. The temperature of 160°C is the inflection points of fall and rise for Si₃N₄ ceramic friction coefficient. The friction coefficient is the maximum when the applied load is 360 N and reciprocating frequency is 80 Hz. It concludes that the machining surface morphology control improves the wear resistance of structure ceramics.

Key words: Si₃N₄ ceramics; fractal dimension; friction characteristics; surface profile control; rotary ultrasonic grinding

1 引 言

随着航空航天、精密机械、惯性制导、核能装备等领域科学技术的发展和结构件性能需求的提高,许多零部件对材料提出了新的要求,希望材料在高温环境下既具有较高的强度和硬度,同时又具有低质量、耐腐蚀、耐磨损、随温度变化不敏感等性能。结构陶瓷因其优良的物理性能和化学性能,可满足上述要求从而得到广泛应用^[1]。在现有结构陶瓷材料中, Si₃N₄ 陶瓷由于具有较高的工作温度和力学强度,成为飞行器动力系统中最有前途的零部件材料。在动力系统工作环境中,陶瓷零部件之间的相互运动会造成运动阻力和能量耗散,同时相互作用表面会发生一系列力学和表面形貌变化,形成摩擦特性。

许多学者对结构陶瓷表面摩擦特性的行为展开了研究,研究最多的材料包括 Si₃N₄、SiC、Al₂O₃ 等^[2-5]。Mirea 通过研究陶瓷材料摩擦特性,将其磨损机制分为摩擦初期的微裂纹控制的晶粒拔出、脆性断裂及后期的塑性变形^[6]。Deng、Alexandr、田欣利等分别研究了 Si₃N₄ 陶瓷与钢、金刚石半球及 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在干摩擦条件下的摩擦磨损行为,认为干摩擦状态下陶瓷表面存在脆性断裂、晶界断裂及穿晶断裂^[7-9]。Wang 等人研究了 Si₃N₄ 和 SiC 陶瓷在水中和乙醇的摩擦行为,提出不光滑的摩擦表面有利于摩擦化学产物堆积,形成摩擦化学反应膜,从而可有效降低摩擦因数和磨损率^[10]。任靖日等人通过对 MoSi₂/Si₃N₄ 配对副高温磨损性能的研究发现摩擦系数随载荷的增加而减少,磨损率随着温度的上升而明显增加^[11]。

陶瓷表面摩擦行为非常复杂,影响因素很多,外部因素包括摩擦方式、环境、负载、滑动速度、温度、配副材料、时间等,内部因素包括硬度、断裂韧性、弹性模量、粒径、气孔率、晶界相等^[12-13]。以上研究多集中于对结构陶瓷摩擦磨损方式和磨损机理的研究,对微观形貌变化以及对摩擦因数影响的研究较少。

在金属材料摩擦特性研究中,为了考虑微观形貌特征对摩擦特性的影响,许多学者引入了分形理论,并得出了卓有成效的研究结果。Majumdar 认为随机粗糙表面具有非稳定的自相似特点,对粗糙表面的分形特征和分形模拟进行了研究,提出了 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数(简称 W-M 函数)^[14-15]。Zhou 等人利用分形理论研究工程表面磨损过程,指出采用结构函数法计算表面形貌分形维数精度最高^[16]。葛世荣、陈国安等利用分形维数研究了磨合表面的形貌变化过程,认为粗糙表面具有明显的分形特征,提出采用结构函数法计算磨损表面轮廓的分形维数和尺度系数,并提出了摩擦分形行为理论^[17-19]。Zhu 等通过研究干摩擦条件下的磨损碎片特性,发现其形貌符合分形法则,并指出分形维数和比例系数与磨损率之间有着密切的关系,可以用来对磨损状态变量进行有效的描述^[20]。

结构陶瓷材料具有较高的硬度和较低的断裂韧性,其摩擦过程中表面磨损方式及磨损机理与金属材料不同,其摩擦特性的分形行为与金属材料具有很大差异,但目前还未有相关文献详细介绍。旋转超声磨削由于切削力小,加工效率高,已成为结构陶瓷零件优选加工方式。因此,本文以 Si₃N₄ 陶瓷旋转超声磨削加工表面为对象,基于分形理论建立摩擦因数分形模型,并根据 Si₃N₄

陶瓷工作条件和摩擦方式开展 Si_3N_4 陶瓷摩擦表面形貌、摩擦因数等特性试验研究,为提高结构陶瓷零部件耐磨性提供技术支持。

2 摩擦因数分形模型

2.1 摩擦过程分析

工程陶瓷材料为脆性断裂,不论采用普通磨削还是旋转超声磨削加工, Si_3N_4 陶瓷加工表面形貌均不可避免的会存在一系列沟壑、破碎剥落特征和微小粉末簇集,造成加工表面轮廓起伏变化。在初始摩擦过程中, Si_3N_4 陶瓷试样的轮廓与对偶件轮廓关系如图 1 所示。

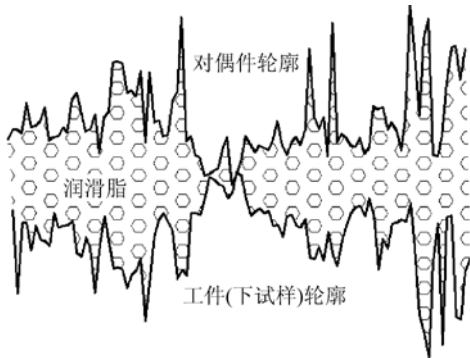


图 1 摩擦初始阶段陶瓷表面轮廓

Fig. 1 Ceramic surface profiles in initial friction phase

随着摩擦的进行,在一定施加压力和运动速度下, Si_3N_4 陶瓷试样轮廓与对偶件轮廓产生部分重叠。由于弹塑性作用,在重叠处会形成新的轮廓,如图 2 所示。

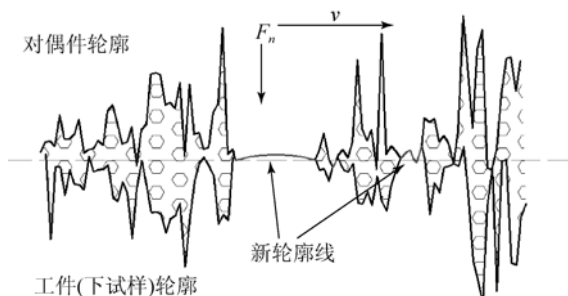


图 2 摩擦过程中陶瓷表面轮廓接触

Fig. 2 Ceramic surface profiles during friction

虽然工程陶瓷材料塑性性能不明显,但仍存在一定弹塑性变形。与金属材料摩擦过程类似,

在工件轮廓与对偶件轮廓交叉结合处,工件表面将发生弹塑性变形。与金属材料不同的是,工程陶瓷具有较高的硬度和较低的断裂韧性,摩擦过程中, Si_3N_4 陶瓷试样轮廓高点易形成如图 3 所示的微观裂纹。

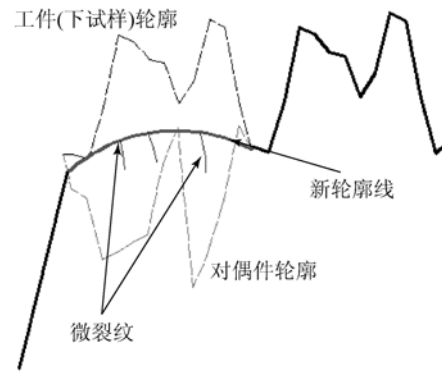


图 3 陶瓷试样表面微裂纹产生过程

Fig. 3 Generation process of micro-cracks in ceramic sample surface

Si_3N_4 陶瓷的加工表面满足形状自相似和统计自相似性,针对 Si_3N_4 陶瓷试样摩擦过程和材料特性,可以采用分形理论对摩擦特性进行研究。取 Si_3N_4 陶瓷试样轮廓与对偶件轮廓重叠部分中一段进行研究,如图 4 所示。

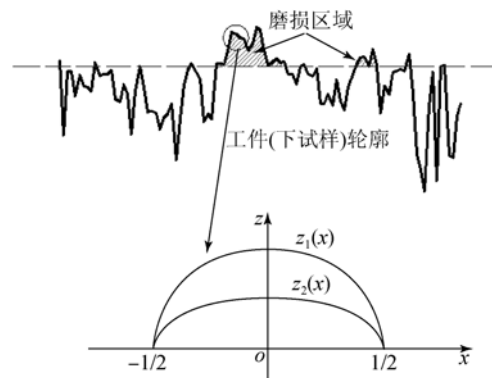


图 4 局部相互接触轮廓模型

Fig. 4 Partial model of mutual contact profiles

2.2 接触面积计算

由于试样轮廓与对偶件轮廓不是完全重叠,因此试样与对偶件的接触面积并不是真实接触面积。根据分形理论知,两粗糙平面接触时,微接触点面积的分布规律与海洋面岛屿面积的分布规律

相同,即满足幂律关系,若最大的接触点面积为 a_1 ,数量为 1,则接触点数表达式为^[19]:

$$N(A > a) = K_s (a_1/a)^{D/2}, \quad (1)$$

式中: N 为接触点面积大于面积 a 的接触点总数; D 为接触轮廓线的分形维数; K_s 为比例系数。

因此,接触点的面积分布函数为:

$$n(a) = \left| \frac{dN}{da} \right| = K_s \frac{Da_1^{D/2}}{2a^{(D+2)/2}}. \quad (2)$$

假设最小接触点面积 $a_s \rightarrow 0$,则总的真实接触面积为:

$$A_r = \int_0^{a_1} n(a) da = K_s \frac{D}{2-D} a_1. \quad (3)$$

2.3 临界接触面积计算

根据弹塑性力学知,存在某一临界变形量 δ_p 使接触变形由弹性变形转为塑性变形,且数学表达式为^[19]:

$$\delta_p = \left[\frac{\pi K \varphi}{2} \right]^2 R, \quad (4)$$

式中: K 为相关系数, $K = H/\sigma_y$; φ 为材料特性系数, $\varphi = \sigma_y/E$; σ_y 为材料的屈服强度,单位为 MPa; E 为复合弹性模量,研究中选取同种材料的摩擦副,其值为材料弹性模量的 1/2。

同理,根据脆性固体断裂力学知,对于工程陶瓷,在塑性变形过程中,随着变形量的增大,材料内部应力也增大,造成内部微观裂纹成核并发生扩展,因此也存在某一临界变形量 δ_f 使接触变形由塑性变形转为裂纹扩展。

设 Si₃N₄ 陶瓷试样表面的分形维数为 D_s ,由于表面满足分形特征,则任一表面轮廓曲线的分形维数 D 满足:

$$D = D_s - 1. \quad (5)$$

根据 W-M 数学模型,分形轮廓的数学表达式为^[14]:

$$z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{+\infty} \frac{\cos(2\pi\gamma^n x)}{\gamma^{(2-D)n}}, \quad (6)$$

式中: $z(x)$ 为表面轮廓高度值; x 为表面轮廓坐标值; D 为分形维数; G 为尺度系数,反应轮廓的不平整度; γ^n 为表面轮廓空间频率,约为 1.42 ~ 1.5; n 为轮廓最低空间频率序列整数。

对于变形区域,忽略更小尺度上的细节,在摩擦过程初始阶段,设分形维数和尺度系数分别为 D_1 和 G_1 ,在 l 范围内的轮廓线变形前的微凸体可表达为^[19]:

$$z_1(x) = G_1^{(D_1-1)} l^{(2-D_1)} \cos\left[\frac{\pi x}{l}\right] \left[-\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2}\right]. \quad (7)$$

由此可以得出分形轮廓在 $x=0$ 处曲率半径的表达式为:

$$R = \left| 1 / \left| \frac{d^2 z_1}{dx^2} \right|_{x=0} \right| = \frac{l^{D_1}}{\pi^2 G_1^{(D_1-1)}} = \frac{a^{D_1/2}}{\pi^2 G_1^{(D_1-1)}}, \quad (8)$$

其中 a 为接触点面积,且与接触线长度 l 满足 $a = l^2$ 。

摩擦后,轮廓线分形维数和尺度系数分别转变为 D_2 和 G_2 ,在 l 范围内的轮廓线变形前的微凸体可表达为:

$$z_2(x) = G_2^{(D_2-1)} l^{(2-D_2)} \cos\left[\frac{\pi x}{l}\right] \left[-\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2}\right], \quad (9)$$

故试样轮廓在 $x=0$ 处变形量可表示为:

$$\delta = \left| G_1^{(D_1-1)} a^{(2-D_1)/2} - G_2^{(D_2-1)} a^{(2-D_2)/2} \right|. \quad (10)$$

当 $\delta = \delta_p$ 时,即可求出接触变形由弹性变形转为塑性变形时临界接触点面积 a_p 为:

$$\left| G_1^{(D_1-1)} a_p^{(2-D_1)/2} - G_2^{(D_2-1)} a_p^{(2-D_2)/2} \right| = \left[\frac{\pi K \varphi}{2} \right]^2 \frac{a_p^{D_1/2}}{\pi^2 G_1^{(D_1-1)}}. \quad (11)$$

由压痕裂纹成核的位错塞积模型知,裂纹开裂存在临界载荷^[21]:

$$P^* = 885 \left[\frac{K_{IC}}{H} \right]^3 K_{IC}, \quad (12)$$

其中 K_{IC} 为材料断裂韧性,单位为 MPa · m^{1/2}。

当接触面积承受的载荷等于裂纹临界载荷时,材料变形将由塑性变形转为微观裂纹扩展,临界接触点面积可表示为:

$$a_f = \frac{P^* \cdot A_r}{F_N}, \quad (13)$$

其中 F_N 为施加压力,单位为 N。

2.4 载荷计算

根据 Hertz 接触理论,当接触点的变形为弹性变形时,接触点上的载荷为:

$$P_e(a) = \frac{4\sqrt{\pi}EG_1^{(D_1-1)}a^{(3-D_1)/2}}{3}. \quad (14)$$

当接触点的变形为塑性变形时,接触点上的载荷为:

$$P_p(a) = Ha = K\sigma_y a. \quad (15)$$

当接触点产生裂纹扩展时,接触点上的载荷为:

$$P_f(a) = P^*. \quad (16)$$

接触面总载荷应为各类型载荷之和,即为:

$$F_N = P^* \int_{a_p}^{a_t} n(a) da + \frac{4\sqrt{\pi}EG_1^{(D_1-1)}}{3} \int_{a_p}^{a_t} n(a) a^{(3-D_1)/2} da + K\sigma_y \int_0^{a_p} n(a) ada \quad (17)$$

本文试验中的 Si₃N₄ 陶瓷材料参数为:断裂韧性 K_{IC} = 3.64 MPa · m^{1/2}, 硬度 H = 8 442 MPa, 弹性模量 E₁ = 262 000 MPa, 设最大接触点面积为 a_t = 0.001 mm², 初始阶段 Si₃N₄ 陶瓷表面轮廓分形维数 D₁ 分别取为 1.4, 1.45, 1.5 和 1.55, 根据公式(17)可以得出接触面总载荷随 Si₃N₄ 陶瓷摩擦后表面轮廓分形维数的变化规律, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 无论初始表面轮廓分形维数如何, 当摩擦后陶瓷材料表面轮廓分形维数 D₂ 在 1.3~1.6 变化时, 接触面总载荷随 D₂ 变化的规律为先降低后增大, 即对于任一初始表面轮廓分形维数都存在一个表面轮廓分形维数 D₂ 使得接触面总载荷最小。

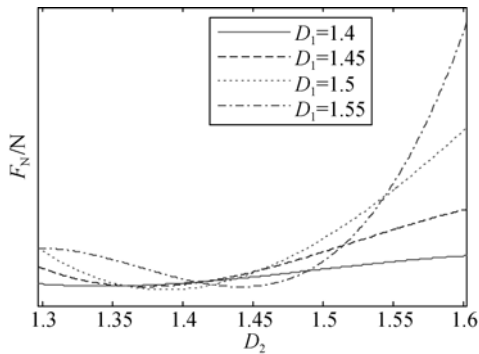


图 5 接触面总载荷与摩擦后表面轮廓分形维数的关系
Fig. 5 Relationship between total load of contact surface and fractal dimension of surface profile after friction

2.5 摩擦因数计算公式

根据 Zhou 等人的研究, 滑动摩擦力可表达为^[19]:

$$F = C \cdot F_N + (1 - C^2) \tau A_{rp}, \quad (18)$$

其中 C 为临界剪切应力系数, 且 0 ≤ C ≤ 1。

同时, 滑动摩擦力与接触面总载荷又存在下列关系:

$$F = \mu \cdot F_N. \quad (19)$$

联合公式(18)和公式(19), 可以得出摩擦因数表达式如公式(20)所示。

$$\mu = C + \frac{(1 - C^2) \tau A_{rp}}{F_N}, \quad (20)$$

其中 A_{rp} 为塑性变形面积, $A_{rp} = \int_0^{a_p} n(a) ada$ 。

根据材料参数及条件, 取临界剪切应力系数 C = 0.2, 可以得出摩擦因数随 Si₃N₄ 陶瓷摩擦后表面轮廓分形维数的变化曲线, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 摩擦因数随 D₂ 的变化情况与载荷恰好相反, 其曲线类似正态分布, 变化规律为先增大后减小, 并最终趋于一定值, 即对于不同初始表面轮廓分形维数, 存在一个表面轮廓分形维数 D₂ 使得摩擦因数最大。

图 7 为选取不同初始摩擦和摩擦后表面轮廓分形维数对时, 摩擦因数随临界剪切应力系数的变化规律。从图中可以看出, 无论初始摩擦和摩擦后表面轮廓分形维数如何变化, 摩擦因数都随临界剪切应力系数的增加而增加。该结论对降低摩擦因数具有重要作用。对于陶瓷材料摩擦副, 其材料剪切应力相对固定, 可以通过添加润滑液, 在摩擦副中形成润滑膜来降低临界剪切应力系数, 从而进一步降低摩擦系数。

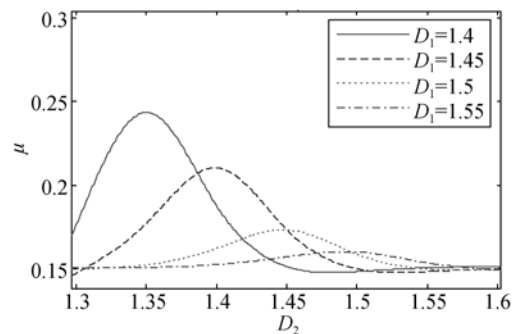


图 6 摩擦因数与摩擦后表面轮廓分形维数的关系
Fig. 6 Relationship between friction coefficient and fractal dimension of surface profile after friction

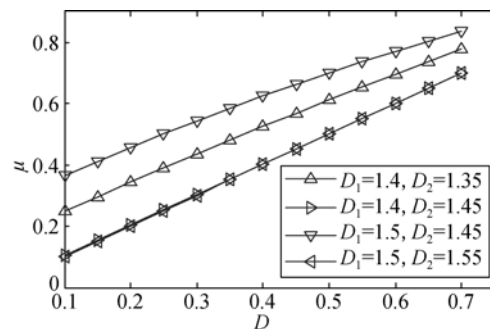


图 7 摩擦因数与剪切应力系数关系
Fig. 7 Relationship between friction coefficient and shear stress factor

3 试验设计

试验选用的材料是 Si₃N₄ 陶瓷,其主要材料性能参数如表 1 所示,采用热压烧结工艺制造。

表 1 材料主要参数

Tab. 1 Main parameters of material

材料	弹性模量/GPa	抗弯强度/MPa	断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	硬度/GPa
Si ₃ N ₄	262.1±1.6	525.9±20.8	3.64±0.11	8.442

考虑到相关研究背景的情况:摩擦副为面面接触,下试样及对偶件都为 Si₃N₄ 陶瓷,且应用于动力系统环境,工作温度不高于 215℃,因此试验设备选用 SRV 高温摩擦磨损试验机,摩擦副采用甘油润滑。试验过程中,影响 Si₃N₄ 陶瓷摩擦特性的主要因素有温度、施加载荷和往复频率。为了便于后续结果分析,应尽可能地增加因素水平,扩大影响因素参数范围,试验方案采用三因素八水平均匀设计试验,因素及其位级如表 2 所示。

表 2 因数及位级

Tab. 2 Factors and levels

位级	温度/℃	施加载荷/N	往复频率/Hz
1	40	360	10
2	65	380	20
3	90	400	30
4	115	420	40
5	140	440	50
6	165	460	60
7	190	480	70
8	215	500	80

选择均匀设计表 U₈(8³)设置试验参数,试验进行了 8 次,具体试验安排如表 3 所示。

表 3 均匀设计试验表

Tab. 3 Uniform design table

实验组别	温度/℃	施加载荷/N	往复频率/Hz
1	40	420	70
2	65	500	50
3	90	400	30
4	115	480	10
5	140	380	80
6	165	460	60
7	190	360	40
8	215	440	20

按照试验安排和试验机下试样图纸要求,采用 DMG Ultrasonic 50 超声振动复合加工中心旋转超声磨削加工 8 组试样作为样品,旋转超声磨削加工过程中振动系统超声振动频率为 23 kHz,振幅约为 6 μm,所采用的刀具为 DMG SAUER 制造的青铜基金刚石磨头其外径为 10 mm,内径为 7 mm,粒度为 D126,浓度为 100,加工工艺参数如下:主轴转速为 8 000 r/min,进给率为 350 mm/min,切深为 0.1 mm。为进行试验对比,采用普通磨削加工 8 组试件,其加工条件同上。图 8 为摩擦磨损试验设备及试样。试验过程中采集摩擦因数数值,采用 FEI HELIOS NanoLab 600i FIB/SEM 双束系统对每个试样摩擦前后表面进行扫描式电子显微镜(SEM)观察。

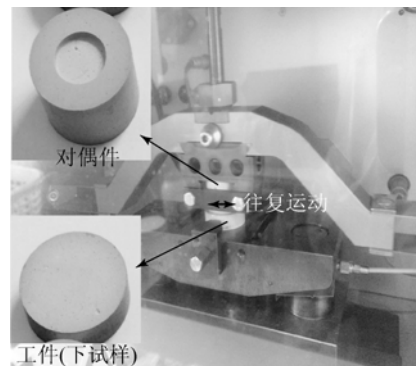


图 8 试验设备及试样

Fig. 8 Test equipment and samples

4 试验结果分析

4.1 摩擦后表面形貌分析

图 9 为旋转超声磨削加工的 Si_3N_4 陶瓷下试样按照表 3 中试验顺序和参数进行摩擦后的表面微观形貌。从图中可以看出, Si_3N_4 陶瓷摩擦后表面微观形貌的显著特点是产生了许多微观裂纹。 Si_3N_4 陶瓷旋转超声磨削加工中, 材料去除方式主要为脆性断裂, 其加工后表面微观形貌是由一系列沟壑、破碎剥落特征和微小粉末簇集组成。 Si_3N_4 陶瓷具有较低的断裂韧性, 其塑性行为不显著, 摩擦过程中, 突出的表面轮廓区域在法向载荷和切向载荷作用下, 易产生微观裂纹, 并发生扩展。微观裂纹的存在是陶瓷材料区别与金属材料摩擦过程的重要特性。在陶瓷材料摩擦特性研究中, 必须考虑微观裂纹的产生及扩展。

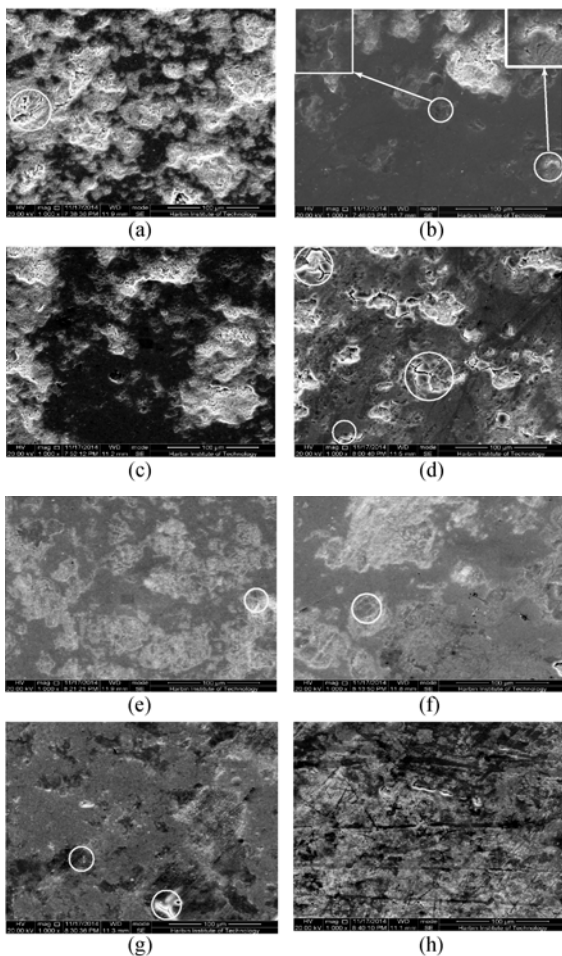


图 9 摩擦后表面形貌观察图

Fig. 9 Surface morphology after friction

Si_3N_4 陶瓷摩擦后表面微观形貌除出现显著的微观裂纹外, 通过进一步分析图 9(h) 还可发现其表面还出现了塑性划痕, 沟槽边缘材料突出, 这说明摩擦过程中同时存在塑性域材料去除。

采用分形维数对摩擦后表面微观形貌进行进一步分析。由于差分盒维数法具有较高的计算精度, 本文利用该方法计算了各表面分形维数, 其基本方法为:

(1) 读入加工表面灰度图像, 其中 Z 为加工表面的微观形貌灰度值;

(2) 将加工表面划分成大小为 a 的正方形网格, 则尺度因子 $r = A/a$, 此时用大小为 $a \times a \times z$ 的盒子覆盖加工表面矩阵, 且满足 $\lfloor A/a \rfloor = \lfloor \max(Z)/z \rfloor$, 其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整;

(3) 任意网格 (i, j) 内最大灰度值和最小灰度值分别落在第 l 和第 k 个盒子内, 则尺度为 r 时, 在该网格内的盒子数目为 $N(i, j) = l - k + 1$, 整个加工表面覆盖总盒子数目为 $N_r = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N(i, j)$, 分形维数 $D = \lg(N_r) / \lg(r)$ 。

通过差分盒维数法计算得出各表面分形维数值, 如图 10 所示, 其中直线表示旋转超声磨削加工后 Si_3N_4 陶瓷表面分形维数值。从图 10 可以看出, 对于不同摩擦过程, 摩擦后表面微观形貌分形维数值并不都低于摩擦前的表面分形维数。分形维数可以反映表面微观形貌变化剧烈程度, 进而反映加工表面粗糙度的变化程度, 对于试验号为 1、3、4 和 8 的试样, 摩擦后表面质量下降。图 11 为摩擦表面粗糙度 R_a 值, 其变化规律基本与分形维数一致, 也证明了分形维数的分析是准确的。

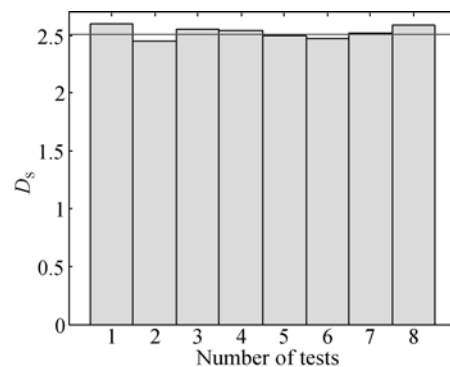


图 10 摩擦后表面分形维数值

Fig. 10 Surface fractal dimension after friction

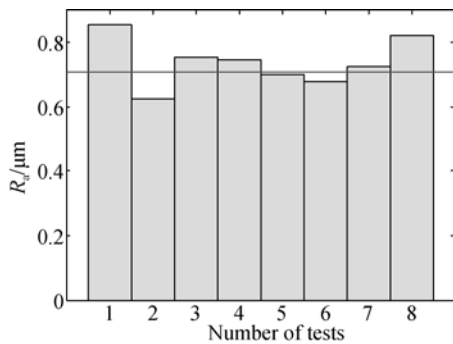


图 11 摩擦后表面粗糙度值

Fig. 11 Surface roughness after friction

Si₃N₄ 陶瓷在摩擦过程中易产生微观裂纹,表面微观裂纹相互扩展并相遇,将引起材料去除,形成新的微观形貌,从而造成表面微观形貌变化加剧,最终导致表面分形维数值增大。同时由于去除的 Si₃N₄ 陶瓷粉末及颗粒残留在摩擦副中,摩擦过程中粉末及颗粒将在表面产生划痕及沟壑,如图 9(h)中所示,这些行为都将引起表面分形维数增大,表面质量下降。

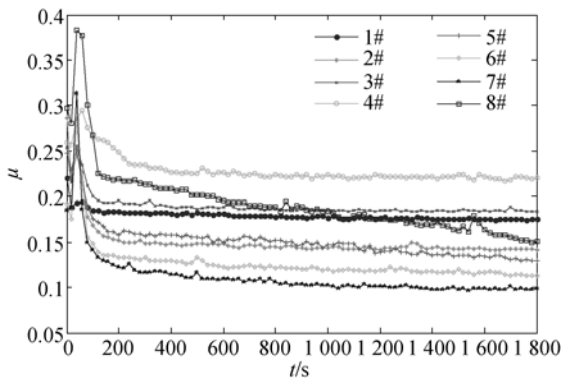


图 12 摩擦因数随时间变化曲线

Fig. 12 Friction coefficient varies with time

4.2 摩擦因数变化分析

图 12 为旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样进行表 3 摩擦试验时,摩擦因数随时间的变化曲线,其变化规律为先增大后减小,最终趋于稳定。陶瓷材料的旋转超声磨削加工表面存在一系列凸起和沟壑,表面比较粗糙。摩擦初始阶段,两粗糙表面接触,接触面积较小,在施加载荷作用下,表面轮廓尖锐凸起部分相互挤压和咬合,滑动过程中运动阻力较大,摩擦系数也增加。随着摩擦过程的进行,表面轮廓尖锐凸起部分逐渐磨损

去除,接触面积增大,表面应力减小,使滑动摩擦中阻力下降,造成摩擦系数降低。同时,摩擦过程中摩擦副温度上升,润滑膜剪切应力减小,剪切应力系数下降,从而引起摩擦系数降低。当材料表面磨损量和表面温度变化量较少时,摩擦过程达到稳定,摩擦因数也趋于平稳。

摩擦因数的变化与陶瓷材料表面微观形貌具有很大关系,图 13 反映了旋转超声磨削加工和普通磨削加工方式下 Si₃N₄ 陶瓷摩擦系数与表面微观形貌分形维数的关系。

对试验数据分别拟合,得出普通磨削和旋转超声磨削加工表面分形维数与摩擦系数的关系分别如公式(21)和公式(22),此时拟合曲线的残差平方和分别为 0.000 37 和 0.000 124,修正的复相关系数分别为 0.879 8 和 0.924 8,表明曲线拟合相关性较好,可满足分析及预测需求。当表面分形维数在 2.38~2.63 区间增大时,摩擦因数呈波形变化。

$$\mu = 0.147\ 3 + 0.079\ 2 \sin \left\{ \frac{D_s - 0.261\ 7}{0.103\ 2} \pi \right\}, \quad (21)$$

$$\mu = 0.164\ 4 + 0.074\ 69 \sin \left\{ \frac{D_s - 0.186\ 4}{0.083\ 7} \pi \right\}. \quad (22)$$

摩擦后表面分形维数在 2.38~2.46 时,表面形貌起伏变化程度低,表面平缓,随着分形维数的增加,表面沟壑和凹槽等特征增加,表面贮存较多润滑油,润滑膜较厚,剪切应力较小,从而造成摩擦系数降低。当表面分形维数大于 2.46 时,随着分形维数增加,摩擦系数的变化规律与图 6 的理论分析结果一致。此时 Si₃N₄ 陶瓷材料表面微观形貌对摩擦系数的影响起主导作用。表面分形维数增大表明表面微观形貌幅值变化剧烈,各种复杂、不规则的表面结构特征增加,造成滑动阻力上升,必然增大摩擦系数。但是,摩擦系数并不是随着表面分形维数的增加一直递增。Si₃N₄ 陶瓷材料摩擦过程中,随着微观裂纹的产生及扩展,可产生新的微观形貌特征,同时接触表面存在划痕及沟壑,此时表面分形维数值较大。但微观裂纹的产生和扩展又可释放表面应力,减小塑性变形载荷值,同时表面划痕及沟壑可提高润滑效果,造成摩擦因数降低。

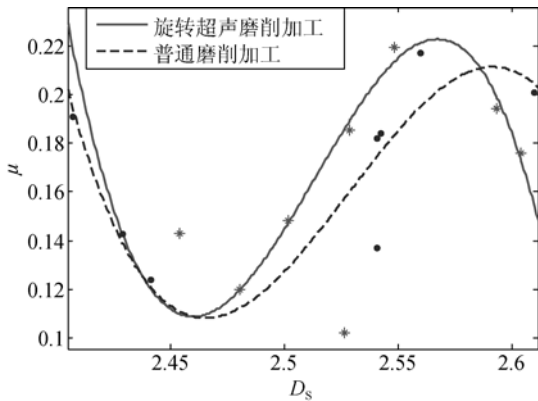


图 13 摩擦因数与表面分形维数关系

Fig. 13 Friction coefficient versus surface fractal dimension

从图 13 可以看出,相对于普通磨削加工,旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样摩擦因数较大,其加工的陶瓷材料表面质量较好,其表面分形维数值小;而普通磨削加工表面分形维数较大,材料摩擦过程中,表面尖锐凸起周围会形成许多微小凹坑,凹坑的存在提高了润滑效果,降低了摩擦系数。

4.3 摩擦因数的影响因素分析

摩擦试验设计中,主要考虑的因素有温度、施加载荷和往复频率,因此这里对均匀设计试验结果进行数据处理,分析这 3 个因素对摩擦系数影响。

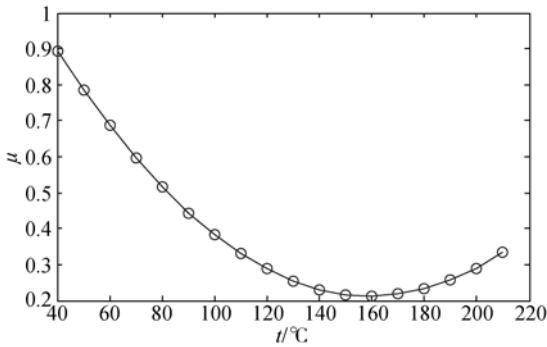


图 14 温度对摩擦因数的影响曲线

Fig. 14 Influence of temperature on friction coefficient

4.3.1 温度对摩擦因数的影响分析

图 14 反映了旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷下试样摩擦因数随温度的变化曲线。从图中可以看出,随着温度的上升,摩擦因数逐渐下降,但当温度大于 160°时,摩擦因数逐渐上升。这是因为当温度低于 160°时,陶瓷材料性能变化较小,随着温度的升高,摩擦副中润滑膜剪切应力下降,从而造成摩擦因数降低。但是,随着温度上升, Si₃N₄ 陶瓷材料性能发生变化,塑性变形行为显

著,断裂韧性增加,造成塑性变形载荷和摩擦阻力增大,导致摩擦系数上升。

4.3.2 载荷对摩擦因数的影响分析

图 15 反映了旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样的摩擦因数随施加载荷变化曲线。由图 15 可知,施加载荷的增加虽然会使 Si₃N₄ 陶瓷表面塑性变形和裂纹扩展行为明显,但同时也使摩擦副的接触面积增大,接触应力降低和润滑效果提高。另外,裂纹扩展可释放部分表面应力,这也会引起摩擦阻力下降,摩擦因数减小。

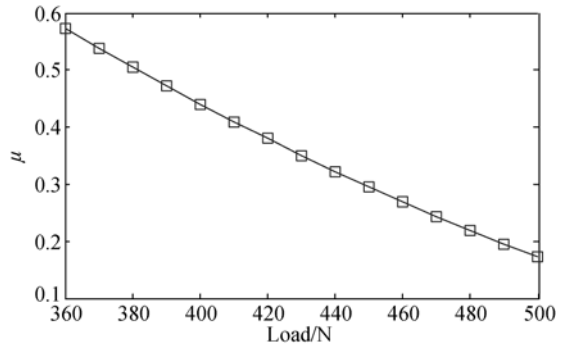


图 15 载荷对摩擦因数的影响曲线

Fig. 15 Influence of load on friction coefficient

4.3.3 往复频率对摩擦因数的影响分析

图 16 反映了旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样的摩擦因数随往复频率的变化曲线。从图中可以看出,随着往复频率的增加,摩擦因数反而上升。这是因为往复频率增加在一定程度上可提高摩擦温度,从而提高润滑效果,降低摩擦因数。但是,往复频率的增加也会使陶瓷材料表面轮廓磨损加剧,而且磨损后的陶瓷材料颗粒残留在摩擦副中,还会造成摩擦表面质量下降,同时破坏润滑膜,造成摩擦系数上升。

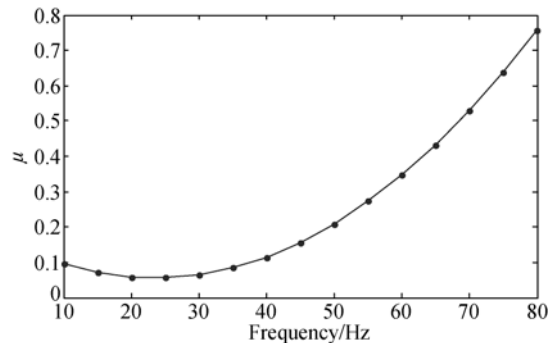


图 16 往复频率对摩擦因数的影响曲线

Fig. 16 Influence of reciprocating frequency on friction coefficient

5 结 论

本文基于分形理论分析了结构陶瓷摩擦过程中接触情况及力学关系,并以旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样面面接触为研究对象,开展了摩擦表面形貌和摩擦因数等特性试验研究。通过以上研究得出:根据结构陶瓷的摩擦过程及材料特性,接触面总载荷应包括弹性变形载荷、塑性变形载荷和微观裂纹开裂载荷,并推导出了其理论分析计算公式。在此基础上建立了结构陶瓷摩擦因数分形模型,得出摩擦因数与结构陶瓷材料的

初始和摩擦后表面形貌分形维数值具有直接关系;Si₃N₄ 陶瓷摩擦后表面微观形貌的显著特点是产生了许多微观裂纹,且由于微观裂纹的存在,造成摩擦后表面形貌分形维数大于初始表面分形维数值 2.52;摩擦因数随时间变化规律为先增大后减小,最终趋于稳定,相对于普通磨削加工,旋转超声磨削加工的 Si₃N₄ 陶瓷试样的摩擦因数较大;温度小于 160°时,随着温度的上升, Si₃N₄ 陶瓷的摩擦因数逐渐下降,温度大于 160°时,摩擦因数逐渐上升;当施加载荷在 360~500 N 内递增时,摩擦因数减小,这与随往复频率变化规律相反。

参考文献:

- [1] 郑书友,冯平法,徐西鹏. 旋转超声加工技术研究进展[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009, 49(11): 1799-1804.
ZHENG SH Y, FENG P F, XU X P. Development trends of rotary ultrasonic machining technology [J]. *Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2009, 49(11): 1799-1804. (in Chinese)
- [2] LI J L, XIONG D S, HUANG Z J, *et al.*. Effect of Ag and CeO₂ on friction and wear properties of Ni-base composite at high temperature [J]. *Wear*, 2009, 267(1-4): 576-584.
- [3] XIA H Y, QIAO G J, ZHOU S L, *et al.*. Reciprocating friction and wear behavior of reaction-formed SiC ceramic against bearing steel ball [J]. *Wear*, 2013, 303(1-2): 276-285.
- [4] ZHENG M, ZHAO J, ZHOU Y H. Friction and wear behaviors of Sialon-Si₃N₄ graded nano-composite ceramic materials in sliding wear tests and in cutting processes [J]. *Wear*, 2012, 290: 41-50.
- [5] 刘虹志, 欧阳家虎, 李玉峰. 热压烧结 TZ3Y20A-SrSO₄ 陶瓷基复合材料的高温摩擦学性能[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(2): 9-13.
LIU H ZH, OUYANG J H, LI Y F. High-temperature tribological properties of hot-pressed TZ3Y20A-SrSO₄ ceramic matrix composites [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 30(2): 9-13. (in Chinese)
- [6] MIREA D A, TRUNFIO-SFARGHIU A M, MATEI C I, *et al.*. Role of the biomolecular interactions in the structure and tribological properties of synovial fluid [J]. *Tribol. Int.*, 2013, 59(SD): 302-311.
- [7] DENG J X, ZHANG H, WU Z, *et al.*. Unlubricated friction and wear behaviors of Al₂O₃/TiC ceramic cutting tool materials from high temperature tribological tests [J]. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 35: 17-26.
- [8] ALEXANDRA K, PAVOL K, JÁN B *et al.*. Effect of the counterpart material on wear characteristics of silicon carbide ceramics [J]. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 44: 12-18.
- [9] 田欣利, 王朋晓, 吴志远, 等. Si₃N₄ 和 CCr15 对巴氏合金摩擦副的摩擦磨损性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(2): 80-83.
TIAN X L, WANG P X, WU ZH Y, *et al.*. Study on friction and wear properties of Si₃N₄, CCr15 and Babbit Pairs [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2013, 27(2): 80-83. (in Chinese)
- [10] WANG L, LIU Y H, SI W J, *et al.*. Friction and wear behaviors of dental ceramics against natural tooth enamel [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(11): 2599-2606.
- [11] 任靖日, 李花, 金石三. 高温下氮化硅的摩擦学性能研究[J]. 延边大学学报:自然科学版, 2003, 29(3): 212-215.
REN J R, LI H, JIN SH S. Friction and wear evaluation of silicon nitride on elevated temperature [J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 2003, 29(3): 212-215. (in Chinese)
- [12] CURTIS L, ANTHONY S, NISHANT T, *et al.*. Tribology of titanium boride-coated titanium balls against alumina ceramic: Wear, friction, and micro-mechanisms [J]. *Wear*, 2008, 265: 375-386.
- [13] DONG X Y, QIAO Y L, ZANG Y, *et al.*. Effect

- of ultrasonic vibration on the behavior of antifric-tion and wear resistance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic friction pairs under oil lubrication [J]. *Physics Procedia*, 2013, 50:449-452.
- [14] MAJUMDARA, BHUSHAN B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1990, 112 (2): 205-216.
- [15] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1991, 113(1):1-11.
- [16] ZHOUG Y, LEU M C, BLACKMORE D. Fractal geometry model for wear prediction [J]. *Wear*, 1993, 170(1): 1-14.
- [17] 陈国安, 葛世荣, 张晓云. 磨合过程中表面形貌变化的分形表征[J]. *润滑与密封*, 1999(2): 55-56.
CHEN G A, GE SH R, ZHANG X Y. Fractal characterization of surface topography changes during running-in process[J]. *Lubrication Engineering*, 1999(2):55-56. (in Chinese)
- [18] 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. *摩擦学报*, 1997, 17(1): 73-80.
GE SH R. The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces [J]. *TRIBOLOGY*, 1997, 17(1): 73-80. (in Chinese)
- [19] 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
GE SH R, ZHU H. *Fractal in Tribology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [20] ZHU Z C, CHEN G. An fractal identification of wear debris group in sliding wear process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 1:49-53.
- [21] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
GONG J H. *Fracture Mechanics of Ceramics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:



荆君涛(1979—),男,内蒙古通辽人,博士,高级工程师,2012年于哈尔滨工程大学获得工学博士学位,现工作于清华大学机械工程系博士后流动站,主要从事硬脆陶瓷材料精密加工及加工表面完整性分析。E-mail: jjt76732@hotmail.com

通讯作者:



魏士亮(1987—),男,山东枣庄人,博士研究生,主要从事工程陶瓷材料精密加工表面完整性研究。E-mail: weishi-liang@hrbeu.edu.cn

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)